中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1088−1094

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160125

滨海低平原干旱区全膜覆土穴播冬小麦田水热特征和产量效应*

巨兆强 董宝娣 孙宏勇 刘小京**

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要 为研究全膜覆土穴播栽培技术在环渤海低平原区对冬小麦田土壤水分、盐分、温度、热量状况和冬小麦产量的影响，采用田间试验法，于 2014—2015 年在中国科学院南皮生态农业试验站，设置全膜覆土穴播(PM)和常规旋耕播种(CK)冬小麦试验，定位监测了耕层土壤温度、水分、盐分和热通量数据动态，并分析了冬小麦产量。结果表明: PM 在越冬期和返青期可以有效保持土壤水分，平均土壤含水量比 CK 高 16.4%，达显著性差异($P<0.05$)；但是，覆膜也阻隔了后期降水对土壤水分的补充，最大含水量差异可达 10.0%。PM 处理 10 cm 深土壤日均温度始终高于 CK 处理，平均增幅 3.8%，差异不显著($P>0.05$)；同时，PM 减小了土壤温度日较差 0.5 ℃。PM 有利于土壤吸收和储存热量，白天具有较高的向下地面热通量，日均土壤热通量比 CK 显著增加数倍。温度和热通量变化均表明覆膜增强了土壤抵御外界温度变化的能力。PM 的土壤电导率显著低于 CK 24.2% ($P<0.05$)，特别是在春季返盐期，PM 的土壤电导率比 CK 降低 39.7%。PM 较 CK 增加了冬小麦穗粒数和千粒重，增产 10.4%，但均未达显著水平。因此，全膜覆土穴播冬小麦栽培技术能改善土壤水热状况，降低土壤盐分对小麦的危害，这为全膜覆土穴播冬小麦栽培技术在环渤海低平原干旱区农业生产中的应用提供理论与技术支持。

关键词 全膜覆土 穴播 土壤水分 土壤盐分 土壤热通量 冬小麦
中图分类号: S152.7; S318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1088-07

Effect of whole filed plastic mulching with bunch planting on soil thermal-moisture characteristics and winter wheat yield in the lowland plain of Hebei Province*

JU Zhaoqiang, DONG Baodi, SUN Hongyong, LIU Xiaojing**

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract The objective of this study was to clarify soil water, soil salinity, soil thermal characteristics and yield of winter wheat in Hebei Lowland Plain under total soil-plastic mulching with soil covering and bunch planting. The study was carried out at Nanpi Eco-agricultural Experimental Station of Chinese Academy of Sciences in 2014–2015. Two treatments included the treatment of plastic film mulching the entire soil surface with bunch planting (PM) and the treatment of rotary tillage with traditional seed planting as the control (CK). Soil moisture content, soil salinity, soil temperature and heat flux was monitored from winter wheat seedling emergency to harvest. Winter wheat yield plus yield components were analyzed too. The results showed that PM improved soil moisture in the topsoil during wintering and re-greening stages. Although soil water content

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B05, 2012BAD05B02)资助
** 通讯作者: 刘小京，主要研究方向为盐碱地区资源高效利用。E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn
巨兆强，主要研究方向为土壤与环境物理学。E-mail: juzhq@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2016−02−01 接受日期: 2016−03−07

* This study was supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2013BAD05B05, 2012BAD05B02).
** Corresponding author, E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn
Received Feb. 1, 2016; accepted Mar. 7, 2016

was higher by 16.4% under PM treatment than the CK treatment ($P < 0.05$), plastic mulching restricted precipitation water supply by up to 10% after re-greening. PM improved soil temperature of the 10 cm deep soil, with average soil temperature increment of 3.8% for the entire growing season ($P > 0.05$). Also PM reduced diurnal range of soil temperature by 0.5 ℃, compared with CK. PM favored the absorption and storage of heat energy, with 14.8 W·m^{-2} more soil heat flux in PM than in CK during the whole growth period. The mean daily soil heat flux under PM increased by several folds over that under CK during daytime, which showed that PM increased downward flow of heat energy. The changes in temperature and heat flux showed that the total plastic mulching enhanced soil ability to resist ambient temperature changes. Electrical conductivity in the topsoil was significantly ($P < 0.05$) lower by 24.2% under PM than under CK during the whole growing season. It showed that PM generally restrained salt accumulation at surface soil. PM increased kernels per spike and 1000-kernel weight of winter wheat compared with CK. The yield of winter wheat increased by 10.4% under PM compared with that of CK ($P > 0.05$). This study provided theoretical and technical support for the application of total plastic mulching in winter wheat fields in coastal plains of Bohai Sea.
Keywords　Whole field plastic mulching; Bunch planting; Soil water content; Soil salinity; Soil heat flux; Winter wheat

环渤海低平原地区光热资源充足，土地资源丰富，是河北省实施沿海发展战略前沿区和潜在粮食增产区。冬小麦播种面积 73.4 万 hm^2，是该区主要的粮食作物。但是，该地区淡水资源匮乏，降水量分布不均导致季节性干旱缺水，自然降水与冬小麦生长需水规律不吻合[1−2]；同时，冬小麦易受春季土壤返盐和低温等因素影响，产量长期低而不稳[3−5]。因此，寻求有效措施来有效保蓄和利用降水、改善春季土壤热量状况和抑制土壤返盐，以及提高作物产量已成为该区小麦增产的关键。

许多研究表明，旱区地膜覆盖可以减少土壤蒸发损失[6−8]，提高作物的水分和养分利用效率[9−11]，增加作物产量[12−14]；同时，地膜覆盖具有提高土壤温度和降低盐碱危害的作用[7,9]。但是，有些研究表明覆膜小麦生长后期易受到高温胁迫导致早衰和减产[15−17]。另一些研究表明，覆膜作物会加剧土壤水分消耗，因此作物产量的提高是建立在高耗水基础上的[17−20]；而且覆膜对作物耗水量的影响在不同地区存在着差异性[21−23]。

近年来，全膜覆土穴播作为一项综合集雨抑蒸和充分利用光热资源的高效旱作小麦栽培技术，保墒、提高水分利用率及作物增产效果显著，在中国西北地区已经得到大面积推广应用[9,12,14,17,21]。目前，关于全膜覆土穴播小麦栽培技术的研究主要集中在保墒增温、作物耗水规律和产量效应等方面，对于该技术在环渤海低平原区对冬小麦田土壤水分盐分的影响，以及如何影响土壤温度和热量状况的研究较少，全膜覆土穴播冬小麦技术在环渤海低平原区的适应性还需进一步深入探讨。为此，本研究在环渤海低平原区的中国科学院南皮生态农业试验站开展全膜覆土穴播冬小麦栽培技术研究，依据观测的土壤温湿度和热通量数据，分析全膜覆土穴播冬小麦技术如何影响冬小麦田土壤温度和热量状况，以期为全膜覆土穴播冬小麦田的水热效应观测和评价提供理论依据。同时，本研究也可为构建环渤海低平原区冬小麦高产栽培模式和挖掘中低产区粮食增产潜力提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2014—2015 年在中国科学院南皮生态农业试验站进行。该站地处北纬 38°06′，东经 116°40′，海拔 20 m 以下。年平均气温 13.4 ℃，≥10 ℃年平均积温 4 600 ℃，年平均日照时数 2 318 h，水面蒸发量 1 500~1 800 mm。该试验区属近滨海的干旱缺水盐渍化类型，多年平均降水量为 572.5 mm，主要集中在 6—8 月(421.5 mm)，约占全年总降水量的 73.6%；无地面水灌溉条件，浅层地下咸水资源丰富，地下水埋深为 5~7 m。

耕地土壤为轻壤质潮土，耕层土壤含盐量 1.08~1.15 g·kg^{-1}，为轻度盐渍化土壤，具有明显的季节性积盐或脱盐现象；土壤容重为 1.42 g·cm^{-3}，平均田间持水量为 34.2%；耕层土壤有机质 10~12 g·kg^{-1}，有效氮、磷和钾分别为 98 mg·kg^{-1}、15 mg·kg^{-1} 和 100 mg·kg^{-1}。

1.2　田间试验设计

采用田间试验法，设冬小麦全膜覆土穴播(PM)和常规旋耕播种(CK)两种种植方式，每个处理的小区面积分别是 240 m^2，没有重复。全膜覆土穴播：夏玉米收获后，采用小麦全膜覆土播种一体机(2MXF-120 型)实施操作，一次性完成旋耕、镇压、铺膜、覆土、播种，播种量 112.5 kg·hm^{-2}，穴距 12 cm，行距 20 cm，膜面覆土 1 cm；常规旋耕播种：播种量 225 kg·hm^{-2}，行距 15 cm。各处理施肥量为 25 kg 磷酸二铵(N-P_2O_5-K_2O：18-46-0)，均在冬小麦播前作

底肥一次施入。冬小麦于 2014 年 10 月 20 日播种, 供试小麦品种为‘小偃 81’, 2015 年 6 月 10 日收获。

1.3 测定项目和方法

土壤水分、温度和电导率: 2014 年 10 月冬小麦播种出苗后, 在小麦行间中心的 5 cm 和 10 cm 土深处均埋设土壤温度盐分湿度传感器(CS650 Soil Water Content Reflectometers, Campbell Inc., 美国)。该传感器可以同时测定土壤含水量、温度和表观电导率, 通过数据采集仪(CR1000, Campbell Inc., 美国)控制和获取, 数据采集间隔为 2 h。

土壤热通量: 在土壤温度盐分湿度传感器旁边土深 7.5 cm 处安装土壤热通量板(HFP01, Hukseflux soil heat flux plate, 荷兰), 同样连接 CR1000 数据采集仪获取数据, 数据采集间隔为 30 min。

冬小麦产量: 小麦成熟时, 在每个处理中央随机选取 2 m^2 样点, 4 次重复, 收获、脱粒计产, 4 次重复的平均值代表实际产量; 并调查每处理 1 m 双行小麦的穗数; 各处理随机选择 20 穗小麦考种, 测定穗粒数和千粒重。

数据处理方法: 采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析, 并用 LSD 法进行产量和各要素差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 全膜覆土穴播对冬小麦田土壤水分的影响

图 1 是冬小麦行间中心 10 cm 土层含水量随时间和降水量的变化。两种处理下的土壤表层含水量变化趋势基本一致。但是在不同生育期内土壤含水量表现不同。越冬期和返青期, 全膜覆土穴播处理的平均土壤含水量为 14.8%, 显著高于常规旋耕播种处理的 12.7%(P<0.05); 表明全膜覆土穴播处理对保持土壤水分可以起到较好的效果。返青期后降水导致土壤含水量快速增加, 然后土壤含水量逐渐下降, 常规旋耕播种处理上升和下降的幅度均大于全膜覆土穴播处理; 常规旋耕播种处理土壤含水量显著高于全膜覆土穴播处理, 尤其是降雨后含水量差异可达 10.0%; 这表明覆膜阻隔了降水对土壤水分的入渗补充。而至冬小麦生育后期(孕穗期至收获期)处理间差异不明显, 这与成熟期小麦耗水减弱和冠层覆盖地面蒸发减少有关。

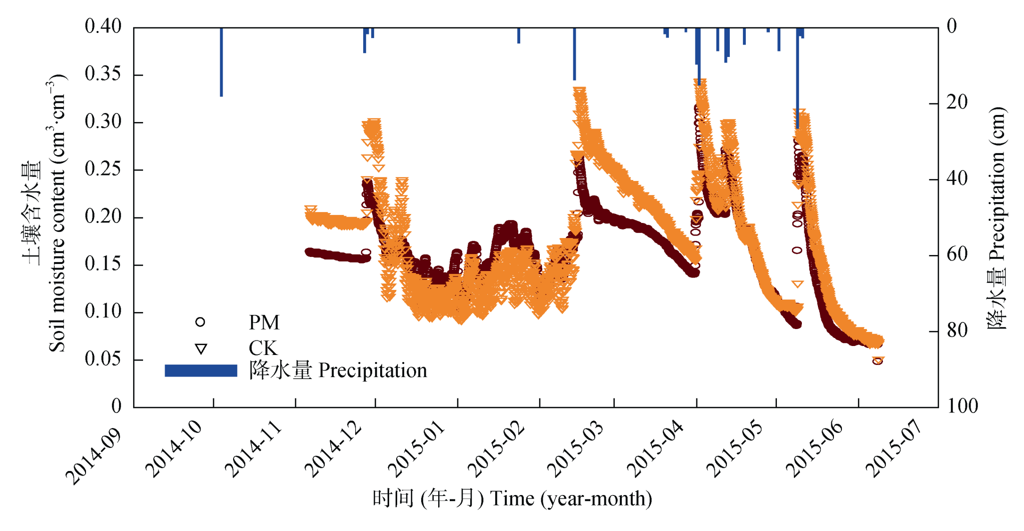


图 1 全膜覆土穴播处理下冬小麦 10 cm 深土壤含水量随时间和降水量的变化

Fig. 1 Dynamics of soil water content at 10 cm depth in winter wheat field under different treatments

PM: 全膜覆土穴播; CK: 常规旋耕播种。下同。PM: whole field plastic mulching with bunch planting; CK: conventional rotary tillage sowing. The same below.

2.2 全膜覆土穴播对冬小麦田土壤温度和热通量的影响

图 2 是冬小麦行间中心 10 cm 土层温度的动态变化。两处理土壤日平均温度变化总体趋势相同。全膜覆土穴播处理 10 cm 深土壤日平均温度始终高于常规旋耕播种处理, 冬小麦全生育期平均高 1.5 ℃(P>0.05), 特别是在冬小麦越冬期(2014 年 12 月—2015 年 2 月中旬); 但是在冬小麦生长后期(3 月中旬后), 处理间温度差异缩小, 全膜覆土穴播处理土壤温度仅比常规旋耕播种处理高 0.3 ℃。表明在冬小麦生育前期全膜覆土穴播一定程度上提高土壤温度, 利于冬小麦的生长。

在冬小麦整个生育期内, 全膜覆土穴播处理土壤的日最高温度比常规旋耕播种处理低 0.8 ℃, 而日最低温度高 0.3 ℃, 结合日最高温度与日最低温度, 发现常规旋耕播种处理显著扩大了土壤日较差, 但处理间差异随生育期的推进逐渐缩小。

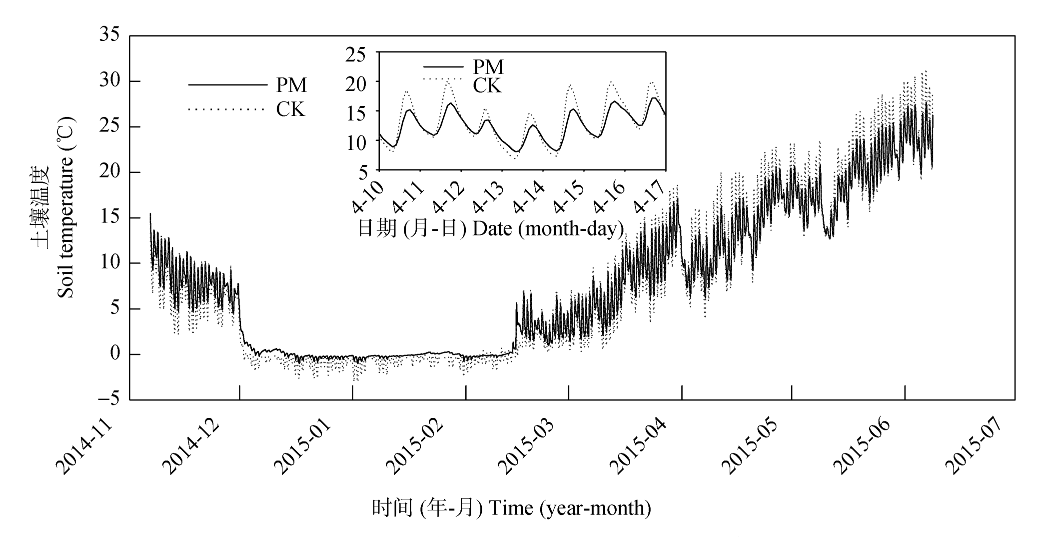


图 2　不同处理冬小麦行间中心 **10 cm** 土层温度随时间的动态变化

Fig. 2　Dynamics of soil temperature at 10 cm depth in winter wheat field under different treatments

图内小图为 4 月 10—17 日不同处理冬小麦行间中心 10 cm 深土壤温度随时间的变化情况。Dynamics of soil temperature at 10 cm depth during Apr. 10th – Apr. 17th was showed in the small figure.

土壤热通量是地气能量交换研究和陆面能量过程模拟的基础[24–25]。热通量正值表示热量向下传输，负值表示热量向上传输。全膜覆土穴播处理的日均土壤热通量显著高于常规旋耕播种处理(图 3)，全生育期土壤热通量平均值为 13.4 W·m^{-2}，比常规旋耕播种处理高 14.8 W·m^{-2}，表明覆膜有利于土壤吸收和储存热量；图 3 内小图为 4 月 13 日 7.5 cm 土层的土壤热通量。全膜覆土穴播处理与常规旋耕播种处理 7.5 cm 土层热通量差异显著(P<0.05)：在热传输较高的中午(11:00—14:00)常规旋耕播种处理土壤热通量仅为全膜覆土穴播处理 45%~60%。从时间相位上看，常规旋耕播种处理土壤热通量达到峰值的时间滞后于全膜覆土穴播处理约 0.5 h。说明全膜覆土穴播处理白天具有较高的向下地面热通量，常规旋耕播种处理夜间具有较高的向上地面热通量，覆膜增强了土壤抵御外界温度变化的能力。

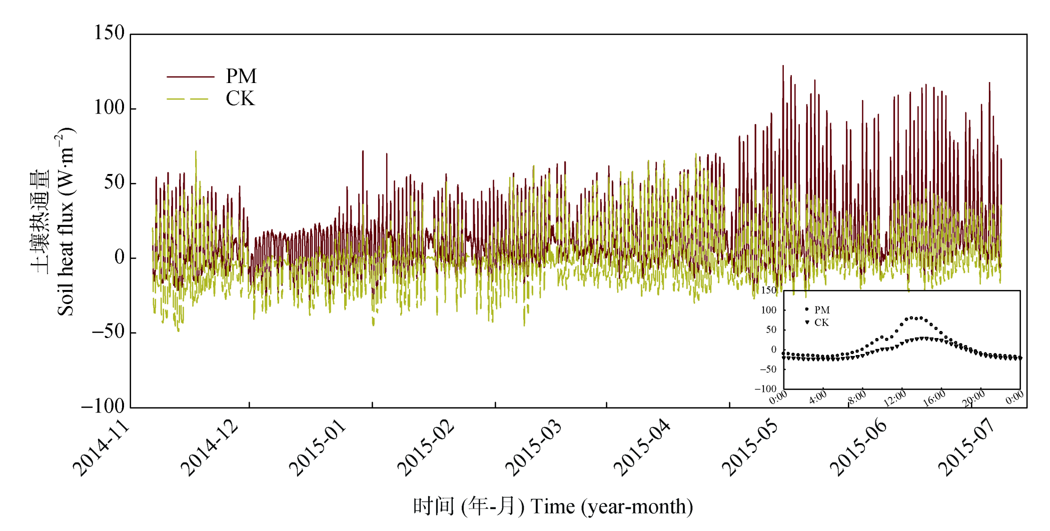


图 3　不同处理冬小麦行间土壤热通量的时间变化

Fig. 3　Dynamics of soil heat flux at 7.5 cm depth in winter wheat field under different treatments

图内小图为 4 月 13 日不同处理冬小麦行间土壤热通量的动态变化情况。Daily dynamics of soil heat flux at 13rd Apr. was showed in the small figure.

2.3　全膜覆土穴播对冬小麦田土壤盐分的影响

图 4 是冬小麦行间中心 10 cm 土层电导率随时间的变化，两种处理下的土壤表观电导率动态变化趋势基本一致，但是在整个生育期内常规旋耕播种处理的土壤电导率高于全膜覆土穴播处理 31.9%，差异达到显著性(P<0.05)，尤其是春季返盐期(2015 年 2 月中旬—3 月下旬)，差异高达 65.8%。返青期以后(2015 年 2 月中旬)，全膜覆土穴播处理的土壤电导率最低，并没有随气温增加而产生返盐现象。可见，覆膜处理能够有效抑制土壤返盐，防止盐害对

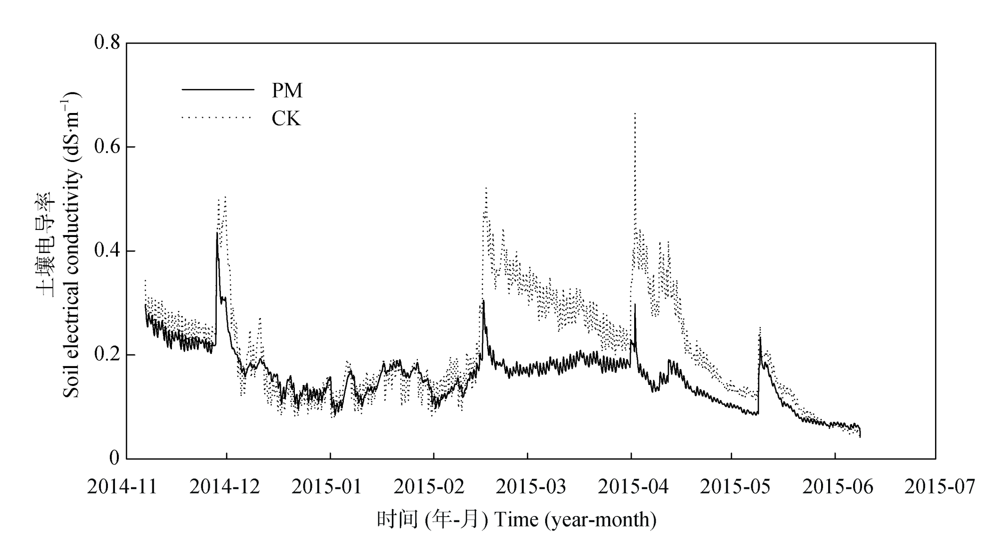


图 4 冬小麦行间中心 10 cm 土层电导率的动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil electrical conductivity at 10 cm depth in winter wheat field under different treatments

冬小麦生长产生危害。

2.4 全膜覆土穴播对冬小麦产量的影响

全膜覆土穴播和常规旋耕播种冬小麦的产量及其构成要素列于表 1。全膜覆土穴播处理的穗粒数和千粒重均高于常规旋耕播种播种，分别增加 9.8%和 4.4%，差异未达显著水平；全膜覆土穴播处理的冬小麦穗数比 CK 处理低 3.4%，差异不显著；全膜覆土穴播可以提高冬小麦产量，与 CK 相比，PM 产量增加 10.4%。可见，全膜覆土穴播处理主要是提高了穗粒数和千粒重，进而达到一定增产的效果。

表 1 全膜覆土穴播和常规旋耕播种播种冬小麦产量及其构成对比

Table 1 Comparisons of yield and its components of winter wheat between whole field plastic mulching with bunch planting (PM) and CK

处理 Treatment	穗数 Spike number (10^4·hm^{-2})	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernels weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})
PM	534.90±33.20a	29.0±1.0a	37.8±0.6a	5 869.69±611.32a
CK	553.95±37.96a	26.4±3.1a	36.2±1.3a	5 314.51±916.29a

3 讨论和结论

覆膜栽培具有集雨保墒、降低作物棵间无效蒸发的效果，显著改善作物生育期内的土壤水分条件[12,19−20]。因此，通过覆膜措施调控土壤水分条件，为作物生长提供更为有利的环境，已经成为旱区作物增产高效栽培中的重要途径。覆膜后土壤储水量可以增加 30%、蒸散量降低 50%，使有限的水分主要用于作物蒸腾性生产[25−27]。地膜冬小麦从越冬至拔节阶段耕层含水量可比露地高 9.4%~11.9%[14]。同时，地膜覆盖有效调控土壤水分时空再分配，有效地促进了土壤作物水分的良性循环[18]。本研究中，全膜覆土穴播有效保护了土壤水分，减小了土壤含水量的大幅度波动，特别是越冬期和返青期，土壤含水量比常规旋耕播种处理高 16.4%，避免了冬小麦返青期干旱胁迫危害，为后期冬小麦生长提供了有利的土壤水分条件。这与已有研究结果一致[18]。但是本研究也表明，由于地膜的阻挡作用，小麦返青期后土壤不能充分得到雨水补充，导致全膜覆土穴播土壤含水量低于常规旋耕播种处理，造成雨水的无谓消耗。2 月中旬降雨后，常规旋耕播种处理土壤能够及时充分地接受水分入渗补充，最大含水量比全膜覆土穴播处理高 28.0%；冬小麦后期(4 月以后)，由于冠层阻隔作用以及地膜的降解破损，即使连续降雨，两种处理间的土壤含水量差异也不显著，全膜覆土穴播处理比常规旋耕播种处理平均低 9.7%。试验区域的降水量及降水时间可能是导致本研究与西北地区全膜覆土穴播研究结果不同的主要原因。冬小麦苗期阶段常规旋耕播种处理含水量高于全膜覆土穴播处理，可能是播种时农业机械压实作用造成的。

土壤热量状况影响着种子萌发、植物根系生长与土壤微生物活性，是作物生长的重要环境因子，可以直接或间接地影响作物的生长[8,11,18]。地膜可以消除土壤潜热交换、减弱显热交换和抑制夜间有效发射辐射，从而导致膜下土壤温度比其他种植方式

下的高[7,13]。苗期低温可影响冬小麦种子萌发和形态建成, 地膜覆盖后增温效果可有效解决这一问题[9]。本研究中, 冬小麦生育期内全膜覆土穴播处理比常规旋耕播种处理土壤温度平均高 3.8%, 日均向下土壤热通量增幅数倍, 改善了表层土壤热量状况, 利于小麦萌发出苗和苗期生长, 与已有研究相一致[7,9]。在冬小麦后期, 由于小麦冠层遮挡光照, 同时全膜覆土降低了地表的空气流动和蒸发强度, 能够阻碍土气界面的水热传输, 因此全膜覆土穴播处理和常规旋耕播种处理间土壤温度和热通量差异逐渐缩小, 避免了小麦遭受高温胁迫导致出现早衰减产的现象[7,9]。另一方面, 全膜覆土穴播处理土壤温度昼夜温差小, 而且土壤温度变化趋势缓于常规旋耕播种处理, 降低了因地温变幅过大而产生麦苗冻害的危险; 全膜覆土穴播处理比常规旋耕播种处理白天吸收了较高的热能, 夜间则释放较低的热能, 也说明了全膜覆土穴播增强了土壤抵御外界温度变化的能力。

环渤海低平原区春季土壤易返盐导致冬小麦盐害胁迫[3]。0~20 cm 土壤盐分是影响冬小麦苗期生长和产量的首要因素, 地膜覆盖抑制了表层土壤积盐, 具有降低盐碱危害的作用, 改善了冬小麦根系生长环境, 增强了冬小麦对盐分胁迫的生态适应性[15]。在冬小麦全生育期内全膜覆土穴播处理的土壤电导率均低于常规旋耕播种处理, 特别是春季返青期电导率差异显著, 最大降盐效果可达 2 倍左右, 有效抑制了土壤返盐, 防止盐害对冬小麦苗生长产生危害。盐分是随着水分的运动而迁移, 水分是盐分迁移的重要载体。虽然降水可以增加土壤含水量, 但是土壤颗粒吸附的盐离子随含水量增加而稀出, 增加了土壤盐溶液的浓度, 导致电导率升高。地膜覆盖可抑制土壤蒸发, 减少土壤水分散失, 土壤底层盐分不能随着水分运动而上移, 减弱了盐分的表聚作用[28]; 此外通过土壤蒸发凝结在地膜底面随后回流的淡水对土壤盐分也有一定的淋洗作用[29]。

全膜覆土措施一定程度上改善了土壤水热状况, 减小了春季返盐对冬小麦植株生长的危害, 从而进一步促进了冬小麦根系对水分的利用能力[18–19]。全膜覆土可以增进后期小麦源库能力和物质的转运, 实现高效水分利用和产量增加[15]。本研究中, 全膜覆土通过影响土壤水温盐条件促进冬小麦前期营养生长, 后期不受高温危害和水分胁迫条件下, 促进小麦籽粒的形成和灌浆, 使穗粒数和千粒重较 CK 增加。因此, 全膜覆土技术可通过改变冬小麦群体结构和充分发挥个体潜力, 改善小麦产量构成因素, 实现冬小麦产量增加。

整体来看, 全膜覆土穴播能改善土壤水热状况, 降低土壤盐分对小麦的危害, 在较低的播种量下可以改善冬小麦产量构成因素和提高产量。这对改善河北低平原区冬小麦农田生产力, 增加作物产量, 提高农田可持续利用具有积极意义。但是, 应该注意麦收后及时清除地膜, 便于土壤接收丰富的雨季降水, 贮存足够的雨水, 以利于下茬夏玉米的生长和下一季冬小麦的播种出苗。由于本研究基于一年的水热试验数据, 并未涉及土壤肥力条件等问题, 所以下一步应进行水热耦合和供肥能力对农田生产力的影响研究; 同时, 应加强对全膜覆土穴播在环渤海低平原区负面影响的研究, 并提出合理的应对措施以保证该技术在这一地区合理安全的推广应用, 为环渤海低平原区粮食生产提高以及节水模式的构建提供更有力的支持。

参考文献 References

[1] 邓振镛, 王强, 张强, 等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278–6288
Deng Z Y, Wang Q, Zhang Q, et al. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6278–6288

[2] 田展, 梁卓然, 史军, 等. 近 50 年气候变化对中国小麦生产潜力的影响分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(9): 61–69
Tian Z, Liang Z R, Shi J, et al. Analysis of impact on China wheat potential productivity of climate change during 1961–2010[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(9): 61–69

[3] 刘小京, 李向军, 陈丽娜, 等. 盐碱区适应性农作制度与技术探讨——以河北省滨海平原盐碱区为例[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 911–913
Liu X J, Li X J, Chen L N, et al. Study on the adaptive farming system in saline soils — A case study in saline area of strand plain in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 911–913

[4] 李振声, 欧阳竹, 刘小京, 等. 建设"渤海粮仓"的科学依据——需求、潜力和途径[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(4): 371–374
Li Z S, Ouyang Z, Liu X J, et al. Scientific basis for constructing the "Bohai Sea Granary" — Demands, potential and approaches[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 26(4): 371–374

[5] 孙宏勇, 刘小京, 邵立威, 等. 不同种植模式对河北低平原区域地下水平衡和水分经济利用效率等的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 214–220
Sun H Y, Liu X J, Shao L W, et al. Effects of different cropping pattern on ground water and economic water use efficiency in the Hebei Low Plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 214–220

[6] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 75(1): 71–83

[7] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境和小麦产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5503–5513
Hou H Z, Lü J F, Guo T W, et al. Effects of whole field soil-plastic mulching on soil thermal-moisture status and

wheat yield in semiarid region on Northwest Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5503–5513
[8] 何春雨, 杜久元, 刘广才, 等. 全膜覆土穴播冬小麦农田土壤含水率与耗水量时空动态[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 131–141
He C Y, Du J Y, Liu G C, et al. Study on the special-temporal dynamics of winter wheat water use efficiency and evapotranspiration under bunch planting and plastic film mulching with soil on flat field during the whole growth season[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 131–141
[9] 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等. 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5580–5588
Wang H L, Song S Y, Zhang X C, et al. Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5580–5588
[10] 李福, 刘广才, 李诚德, 等. 旱地小麦全膜覆土穴播技术的土壤水分效应[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 73–78
Li F, Liu G C, Li C D, et al. Effects of whole film mulching with soil covering and bunch planting on soil water in field of dry-land wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 73–78
[11] 李世清, 李凤民, 宋秋华, 等. 半干旱地区不同地膜覆盖时期对土壤氮素有效性的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1519–1526
Li S Q, Li F M, Song Q H, et al. Effects of plastic film mulching periods on the soil nitrogen availability in semiarid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(9): 1519–1526
[12] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4392–4404
Hou H Z, Lü J F, Guo T W, et al. Effects of whole field soil-plastic mulching on spring wheat water consumption, yield, and soil water balance in semiarid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4392–4404
[13] 程宏波, 柴守玺, 陈玉章, 等. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6316–6325
Cheng H B, Chai S X, Chen Y Z, et al. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6316–6325
[14] 杨长刚, 柴守玺, 常磊, 等. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 661–671
Yang C G, Chai S X, Chang L, et al. Effects of plastic mulching on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat in arid region of northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 661–671
[15] 梁建财, 史海滨, 李瑞平, 等. 不同覆盖方式对中度盐渍土壤的改良增产效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 416–424
Liang J C, Shi H B, Li R P, et al. Improving effect of mulching methods on moderately saline soil and sunflower yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 416–424
[16] 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 99–102
Zhang D M, Chi B L, Huang X F, et al. Analysis of adverse effects on maize yield decrease resulted from plastic film mulching in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 99–102
[17] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 等. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 330–333
Li F M, Yan X, Wang J, et al. The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(3): 330–333
[18] 宋婷, 王红丽, 陈年来, 等. 旱地全膜覆土穴播和全沙覆盖平作对小麦田土壤水分和产量的调节机理[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1174–1181
Song T, Wang H L, Chen N L, et al. Regulation of whole field soil-plastic mulching with bunch planting and whole field sand mulching with flat planting on soil moisture and yield of spring wheat in semiarid dryland areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1174–1181
[19] 李巧珍, 李玉中, 郭家选, 等. 覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 25–30
Li Q Z, Li Y Z, Guo J X, et al. Effects of field rainwater harvesting by plastic mulch and complement irrigation on soil water and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 25–30
[20] 范颖丹, 柴守玺, 程宏波, 等. 覆盖方式对旱地冬小麦土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3137–3144
Fan Y D, Chai S X, Cheng H B, et al. Effects of mulching on soil moisture in a dryland winter wheat field, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3137–3144
[21] 刘广才, 刘生学, 李城德, 等. 不同旱作区覆膜方式对小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 24–29
Liu G C, Liu S X, Li C D, et al. Influences of different plastic film mulching patterns on wheat yield in arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 24–29
[22] 任书杰, 李世清, 王俊, 等. 半干旱农田生态系统覆膜进程和施肥对春小麦耗水量及水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 1–5
Ren S J, Li S Q, Wang J, et al. Effect of plastic film mulching on spring wheat's water consumption and water use efficiency in semiarid agro-ecological system[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2003, 31(4): 1–5
[23] Horton R, Wierenga P J. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(1): 14–20
[24] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, et al. Surface energy balance of a corn residue-covered field[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3/4): 155–168
[25] 张永涛, 汤天明, 李增印, 等. 地膜覆盖的水分生理生态效应[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3): 45–47
Zhang Y T, Tang T M, Li Z Y, et al. Soil physiological and ecological effects of mulching film[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001, 8(3): 45–47
[26] Qin S H, Zhang J L, Dai H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87–94
[27] Li F M, Wang J, Xu J Z, et al. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(1): 9–20
[28] 赵永敢, 王婧, 李玉义, 等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 109–117
Zhao Y G, Wang J, Li Y Y, et al. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw interlayer and plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 109–117
[29] Guo K, Liu X J. Infiltration of meltwater from frozen saline water located on the soil can result in reclamation of a coastal saline soil[J]. Irrigation Science, 2015, 33(6): 441–452